

DAXING JIEDIWANG DUOWEIDU PINGJIA JISHU

大型接地网 多维度评价技术

李 谦 饶章权 肖磊石 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DAXING JIEDIWANG DUOWEIDU PINGJIA JISHU

大型接地网 多维度评价技术

李 谦 饶章权 肖磊石 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

发电厂、变电站大型接地网的主要功能体现在其安全性上。针对目前国内电力系统部分单位对接地网的安全性问题理解较为淡薄,对一些关键的技术观念比较模糊,对接地网的评价手段相对落后,甚至不规范,过于强调接地阻抗单一指标的现状,牢牢围绕着设备和人身安全性,阐述大型接地网多维度的评价方法和各评价指标的校核标准,在此基础上,总结笔者多年在大型接地网测试、评价和解决方案方面的经验,结合具体案例,介绍了多维度评价技术在接地网优化设计和运行维护阶段状态评估的应用,以期解决接地网性能评价实践中遇到的技术问题,顺应了我国电力系统发展和自动化水平提高对接地网安全和精益化的要求。

本书共分为7章,内容涵盖大型接地网多维度评价、入地故障电流暂态最大值的求取、地电位升和网内电位差控制值的校核方法、接地网雷电冲击暂态特性和评价、接地网状态评估技术和接地网优化设计技术等内容,对接地网接地阻抗现场准确测量、接地网腐蚀性诊断技术,以及高土壤电阻率地区接地网降阻优化选型等关键技术均有提及。本书内容以现场实例的介绍为特点,理论与实际结合紧密,图文并茂,具有较强的实用性,是国内介绍大型接地网评价技术方面较为全面的科技图书。

本书可作为教科书补充材料和培训教材,主要供电力行业基层专业技术人员使用,也可作为高等学校电气工程专业在校本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大型接地网多维度评价技术/李谦,饶章权,肖磊石编著. —北京:中国电力出版社,2016.12
ISBN 978-7-5198-0027-7

I. ①大… II. ①李… ②饶… ③肖… III. ①接地网-安全评价 IV. ①TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 278225 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:畅舒

责任校对:王小鹏

装帧设计:张俊霞 张娟

责任印制:蔺义舟

印 刷:三河市航远印刷有限公司
版 次:2016年12月第一版
印 次:2016年12月北京第一次印刷
开 本:787毫米×1092毫米 16开本
印 张:20
字 数:487千字
印 数:0001—1500册
定 价:65.00元



版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换



前言

接地是电气系统的基本设备和安全保障。发电厂、变电站（换流站）大型接地网在工频接地和雷击故障下，接地网电位升（地电位升）以及接地网和地表电位梯度将给设备和人员带来风险，我国曾发生多起由接地网直接引起的电网恶性事故，但由接地网存在安全性问题，导致二次保护误动或拒动而间接引起事故进一步扩大的潜在“风险”则更为普遍。雷电侵入接地网具有与工频接地故障状态不同的特点，雷击入地点附近突变的电位梯度导致局部电位升和电位差异常高的结果，将对雷击注流点附近的二次设备绝缘和稳定运行带来严苛的考验，接地网引起的设备和人员安全性问题几乎都是由电位差造成的，为此，大型接地网的功能主要体现在安全性上，兼有工频和雷击故障下散流和均压作用，限制地电位升、网内电位差、跨步电位差和接触电位差等安全性指标水平，因此，对接地网评价应紧紧围绕安全性，通过对以上四个安全性指标的评价来实现。

由于接地网的隐蔽工程特征和接地技术发展水平导致人们对接地网认识的不足，以往对接地网的评价主要强调接地阻抗，并一味地追求接地阻抗单一指标，新修编的 GB 50150—2016《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》仍部分延续了 0.5Ω 的要求，尽管也考虑跨步电位差和接触电位差，但评价不全面，个别评价标准和手段不合理，没有切入安全性要害，尚未建立科学的接地网评价方法和标准，难以实现对其全面和科学的评价，所采取的解决方案也难以做到有的放矢，技术经济指标较差。

对于大型接地网的评价，接地阻抗要求低于 0.5Ω 的做法不合理的声音早就存在，但由于数值仿真技术和对接地技术认识深度的限制，尚未有科学的接地网评价方法，加上 0.5Ω 的标准较好量化，因此 0.5Ω 一刀切的做法一直延续下来，影响深远。

随着我国电网容量和自动化程度的提高，弱电电子设备广泛应用，对接地网安全性指标的要求越来越高，而目前发电厂、变电站选址征地难度加大，土壤条件恶劣，接地阻抗满足 0.5Ω 的难度加大，这一对矛盾加剧了接地网的安全性问题，使得我国大型接地网的问题较国外更为复杂，解决接地网性能科学评价的问题显得尤为迫切。

大型接地网的评价直接影响到接地网全生命周期工作的成效，进而影响到电网的安全运行，而接地网评价手段和标准的科学性则是接地网评价的基础。因此，基于安全性的接地网评价方法和标准的研究，有着迫切的现实意义。

大型接地网引起的问题主要由电位空间分布（地电位升和电位差）引起，而工频接地存在暂态过程，雷击与工频散流又具有不同的特点，电位的时间分布特性对安全性指标影响显著；大型接地网特性和特征往往不是通过抽象的 4 个安全性指标，而是通过散流性能、均压性能和健康性（电气完整性、腐蚀状态和热稳定性）多个具体要素来表征，上述要素构成影

响接地网安全性的多个方面。

针对大型接地网在设计、验收和运维评价方面存在的困惑和认识误区，笔者提出基于安全性的多维度评价理念，紧紧抓住安全性这条主线，通过梳理影响接地网安全性的众多要素，对涵盖接地网电位时空分布特性、散流性能、均压性能和健康性多个要素的大型接地网多维度评价方法，以及解决方案的关键技术进行理论和试验研究，提出接地阻抗、地电位升、网内电位差和腐蚀状态等综合评价指标控制值的校核方法，建立了一套大型接地网评价流程，以期解决大型接地网科学评价方法问题，指导大型接地网的运行维护和科学设计，由于摒弃传统只强调接地阻抗单一指标的不科学评价模式，取得安全性和经济性的统一，因而可望给接地网设计和评价理念带来深远的影响。

笔者长期从事大型接地网评价、接地网特性参数测试和腐蚀诊断等关键技术的研究和应用工作，积累了较为丰富的现场经验，为此将我们的经验和体会进行归纳梳理，与同行们分享，以期起到抛砖引玉的作用，共同为推进电力系统发电厂、变电站接地技术的进步，提升接地网设计、施工和运行维护水平，顺应接地技术发展的趋势。

本书就大型接地网多维度评价以及解决方案的关键技术进行论述，分为七章，首先就大型接地网多维度评价技术，以及相应的评价指标和限值的校核计算方法，尤其针对复杂的地电位时空分布问题，围绕隔离措施完善后的设备耐受地电位升和电位差能力展开论述；针对短路电流暂态分布特性和最大暂态入地电流的获取，探讨短路电流和地线分流暂态特性和影响因素，介绍短路电流分流计算软件；针对地电位升限值的校核方法，从能量吸收校核角度，对10kV及以下无间隙金属氧化物避雷器和电缆护层保护器对地电位升的耐受水平进行仿真分析，提出基于一次设备耐受的地电位升限值要求；针对网内电位差对二次设备绝缘影响问题，通过开展典型二次设备和元件的工频耐受特性试验，提出接地故障期间接地网网内电位差限值；针对雷电冲击下接地网评价的新问题，通过雷电冲击下真型接地网暂态散流和电位分布特性的试验和仿真分析，介绍避雷针等雷电流注流点周围局部接地网均压优化设计，以及二次电缆布置的要求；关于多维度评价技术的应用，首先介绍基于多维度评价的大型接地网状态评估技术在接地网运维阶段的应用，包括接地网安全性指标的数值仿真计算适应性，交变直流土壤电阻率测量技术、基于地线分流相量测量的接地阻抗准确测量技术，以及基于接地网腐蚀综合诊断技术及应用等内容；另一方面，介绍基于多维度评价的大型接地网优化设计应用，包括接地网安全性指标超标问题的解决方案，针对地电位升偏高所涉及的高土壤电阻率地区接地网降阻技术适用性和有效性等内容，以期指导接地网的科学设计，达到技术经济指标最优。

本书的内容尽量参考和引用国内外的规程、规范和最新研究成果。本书可作为过电压和接地专业技术人员接地网设计和运行维护的参考书，也可作为高等院校电气类专业本科生和研究生的参考书。

本书是广东电网有限责任公司电力科学研究院近年来开展接地网相关工作的总结，期间得到了中国南方电网有限责任公司的科技项目资金资助，部分工作在清华大学、武汉大学、惠州供电局和佛山供电局等单位的参与和帮助下完成，参考和引用了以上单位大量相关论

文、书籍和技术报告，在此深表谢意。另外，还有很多同行为本书的编写提供了资料和意见，在此一并致以诚挚的谢意。

相信本书的出版发行能为推动电力系统接地技术的创新与提升贡献微薄之力，我们期待有更多的接地技术创新成果涌现出来，并与业内同行分享，为我国电力事业的技术进步多做贡献。

由于编者水平有限，难免有不足和错误之处，恳请读者多提宝贵建议和批评。

编著者

2016年12月



目 录

前言	
第 1 章 大型接地网多维度评价	1
1.1 接地网的作用	1
1.2 与接地网相关的安全问题	1
1.3 接地网安全性评价的意义	4
1.4 接地网评价技术的发展	6
1.5 大型接地网多维度评价方法及要素	10
1.6 本章小结	16
第 2 章 大型接地网工频短路电流暂态分布特性	18
2.1 大型接地网电流暂态特性仿真分析	18
2.2 大型接地网工频短路电流分布特性仿真分析	26
2.3 变电站人工单相短路接地试验及分流仿真软件的校验	34
2.4 变电站人工接地短路时接地网电位升高和电位差的计算和实测	40
2.5 本章小结	51
第 3 章 工频接地故障时接地网电位升极限值	52
3.1 工频短路时接地网电位升对一次设备的影响	52
3.2 10kV 及以下避雷器允许地电位升水平	52
3.3 电力电缆护层保护器耐受接地网地电位升 GPR 反击分析	62
3.4 本章小结	68
第 4 章 工频接地故障下接地网网内电位差极限值	69
4.1 二次设备和元件工频耐压特性实验方案	69
4.2 控制电缆的工频耐压特性	70
4.3 常用继电器及交流采样插件的工频耐压	70
4.4 微机保护装置的工频耐压特性	71
4.5 其他低压弱电设备的工频耐压特性	73
4.6 本章小结	74
第 5 章 大型接地网冲击暂态特性	75
5.1 大型接地网冲击暂态特性评估的必要性	75
5.2 大型接地网冲击特性试验平台及试验方法	77
5.3 真型接地网工频特性试验	82

5.4	真型接地网冲击特性试验	84
5.5	大型接地网冲击特性与工频特性对比分析	92
5.6	雷电冲击下大型接地网冲击散流特性仿真模型	95
5.7	大型接地网冲击暂态特性主要影响因素仿真分析	102
5.8	冲击状态下大型接地网优化设计	106
5.9	大型接地网冲击暂态安全性评价和优化设计应用案例	113
5.10	本章小结	116
第6章	基于多维度评价的大型接地网状态评估	117
6.1	大型接地网运行维护的解决方案	117
6.2	消除测量引线互感干扰的站址土壤电阻率测量技术	120
6.3	运行发电厂、变电站大型接地网接地阻抗准确测量技术	124
6.4	大型接地网导体腐蚀综合诊断技术	164
6.5	大型接地网状态评估的基本条件和要求	191
6.6	接地网安全性数值仿真评估	193
6.7	接地网安全性数值仿真评估技术的适应性	199
6.8	接地网安全性状态评估在接地网运行维护中的应用	212
6.9	接地网安全性状态评估在接地网大修改造中的应用	222
6.10	本章小结	227
第7章	基于多维度评价的大型接地网优化设计	229
7.1	基于安全性的大型接地网设计	229
7.2	站址分层土壤电阻率对接地网特性参数的影响	231
7.3	接地网安全性评估在城区变电站接地网设计中的应用	235
7.4	接地网安全性评估在敞开式常规变电站接地网设计中的应用	240
7.5	大型接地网设计的技术经济分析	257
7.6	基于多维度安全性分析的大型接地网规范化设计	269
7.7	大型接地网降阻方法的有效性和适用性	271
7.8	本章小结	307
	参考文献	309

第1章

大型接地网多维度评价

1.1 接地网的作用

在本书中，大型接地网特指发电厂和变电站（换流站，下同）用的大型的水平网状接地装置，通常由水平接地体和垂直接地极组成，为了降阻需要，还包括深井接地极、电解离子接地极和接地模块等，是电气系统的基本设备和安全保障。通俗地讲，大型接地网一般指110kV及以上电压等级变电站的接地网、装机容量200MW以上的火电厂和水电厂的接地网，或者等效面积在5000m²以上的接地网；近年来，GIS变电站广泛应用，虽然接地网面积变小，但接地网面临的安全性问题相同，因此应按照功能性定义，专指流过大短路电流，兼有散流和均压作用的接地网。

一方面，由于土壤散流特性的限制，在发电厂、变电站内发生接地短路故障或遭受雷击（雷直击避雷针或近区雷击）时，强大的短路电流或雷电流流经接地网将引起接地网电位升；另一方面，在地面上出现的电位梯度将使人体承受接触电位差和跨步电位差的风险，因此，大型接地网除了为站内各种电气设备提供公共参考地的基本功能之外，更主要的功能体现在其安全性上，即在上述故障状态下起到快速泄放故障电流或雷电流，改善接地网导体和场区地表电位分布的作用，保障故障状态下一、二次设备和人员安全。

1.2 与接地网相关的安全问题

故障状态下地网电位升通过一定的耦合途径作用在设备的绝缘上，并产生一个电位差，场区地表电位分布不均匀也会造成电位差，因此电位差是造成人身和设备安全风险的原因，接地网引起的问题几乎都是由电位差造成的。发电厂、变电站中存在大量用于监视、控制、测量和保护的二、三次设备和各种自动装置，构成了二次系统，通常工作电压较低，绝缘强度弱，地网电位升和网内电位差对其绝缘和运行的影响尤其值得关注。

多年来，关于发电厂、变电站内跨步电位差和接触电位差造成人身伤亡问题，在我国尚未发现，这是因为短路的发生和人处于最不利发情况的概率很小，这个问题并不突出；然而另一方面，我国曾发生多起由于接地网的缺陷或性能不良直接引起的恶性事故，或接地网特性参数不满足安全性要求而间接导致已发生的事故进一步扩大，严重影响了电网的安全和稳定运行，根据统计，我国发生由于接地系统引起的事故损失每次都在数十到数千万元，而且由于电力系统事故造成停电所产生的间接经济损失则更大，主要原因有：

(1) 接地网本身缺陷引起一次设备直接损坏。首先，由于设备接地不良，当系统发生接地故障短路时，直接造成一次设备损坏的恶性事故，但这种案例并不典型。

1994年1月1日,四川华蓥山发电厂发生污闪,因变压器中性点接地不良,发生发电机、变压器严重烧坏的重大事故,损失十分严重。

(2) 接地网本身缺陷引起异常升高的地电位串入二次设备引起事故扩大。更普遍的情形是,由于发电厂、变电站接地网存在先天不良、不完整等缺陷,或者腐蚀等因素引起接地网导体热稳定性不足,接地网局部性能变坏,当系统发生接地故障短路时,短路电流造成接地网局部电位异常升高,蔓延到二次系统,进而引起站内二次设备损坏而扩大事故。典型案例如下:

1) 1999年7月20日,太原新店变电站发生特大全站停电事故,事故起因是8023插头柜三相短路的较小故障,但由于开关柜地线与主接地网未连接,造成开关柜出现异常高电位,形成反击过电压损坏了直流电源系统,造成直流电控制源失效而不能及时切除故障,导致了事故的扩大。事故造成一台220kV变压器(150MVA)烧毁,10kV的B段配电设备、主控室全部二次设备等严重烧损,并扩大到华北电网,致使部分发电厂共计10台发电机组发生相继跳闸的系统事故。

2) 湖北潜江变电站地处高土壤电阻率地区,采用各种办法降低接地阻抗后,接地阻抗仍高达 1.5Ω 。1986年4月5日,该变电站35kV系统遭受雷击,由于线路故障引入变电站,35kV设备多处放电、燃烧,并发展为相间短路,接地网导体($\phi 8\text{mm}$ 圆钢)热稳定不足而被烧断,引起局部接地网电位升,高电位窜入二次系统,直流二次操作控制回路、保护装置电缆和通信电缆损坏,造成站用电源中断;35kV系统二次设备和通信载波机损坏,通信中断,造成110kV主变压器烧毁以及其他大量设备损坏,事故损失达3000万元。

3) 江西分宜发电厂土壤电阻率较高,接地网接地阻抗为 0.69Ω ,开关场最大短路电流为8kA,1984年7月31日,在110kV倒闸运行操作中,I母线GW4-110隔离开关B相头部断落,甩到II母线同相隔离开关上,形成单相接地短路故障,短路电流6.8kA,地电位升达4.7kV,高压窜入电气和热工二次系统,引发全厂停电和50MW的6号汽轮机超速的严重事故,直接损失达1300万元。

4) 1986年广西合山电厂由于接地网缺陷而引起接地事故,二次电缆端子排烧坏,二次设备烧毁,一台100MW的发电机损坏,最后导致全厂停电的重大事故,事故损失达2000万元。

5) 1991年浙江电网一个110kV变电站发生了35kV开关站短路接地,由于接地网存在问题,使一次系统故障扩大到二次系统,造成全站失压,一、二次设备大量损坏。

6) 1996年12月4日,山东烟台220kV福山变电站1号主变压器由于110kV侧中性点接地不良,在110kV幸山线A相TV(电压互感器)发生污闪时,大电流窜入二次系统,造成直流电源消失,保护拒动,引发全站停电事故,二次设备损坏严重。

7) 1981年3月广州员村变电站员文线A、C相隔离开关同时损坏,部分接地网在相间短路中烧断,地电位升高,高压串入二次回路,引起10多条电缆击穿,并损坏一些保护装置和电能表等,1号主变压器线圈在事故中损坏。

8) 1985~1986年间,湖北胡集、潜江和武钢3个220kV变电站因接地不良,变电站内弧光接地短路事故扩大为全站停电和设备严重损坏的事故。

(3) 接地网布置不合理或存在缺陷导致雷电侵入条件下对二次设备的骚扰。

由于接地网设计不合理或存在缺陷,在雷击(雷直击站内避雷针或近区落雷引起的雷电

波入侵)状态下,引发二次设备绝缘问题或对运行的骚扰。

电力网不但要承受工频短路电流,还会受到雷电流的冲击。在强雷电活动区域,随着电网的高速发展,变电站和出线数量大,大型变电站增多,受雷击的概率增大,近年来,发生多起变电站避雷针联合保护失效或存在雷电保护弱区,导致雷直击或绕击变电站,或者变电站近区落雷导致雷电波侵入变电站的事件。雷击变电站时,接地网只有有限面积起作用,加上我国接地网普遍选用钢材质,放大了雷击下接地网上的地电位分布不均匀性,地电位差远大于工频短路的情形。雷电冲击对设备绝缘的影响,主要是雷电流通过接地网泄流造成较大的暂态地电位升,引起反击;另外,接地网上形成较大电位差又通过二次电缆耦合至二次系统,造成二次电缆的损坏或二次设备的误动、损坏等。此外,雷电流通过防雷装置的接地引下线入地时,会在周围空间产生强大的暂态电磁场,造成对发电厂、变电站内二次设备的干扰。

笔者通过调研,认为雷电引起二次设备故障的主要途径是雷电波侵入引起出线避雷器动作,雷电流进入接地网后,引发接地网电位差,或者通过变压器的耦合到低压电源网络出现较高幅值的过电压,进而对二次系统造成损坏,典型案例如下:

1) 河南某电业局调度大楼在1999年的一次强雷电活动中,雷电损坏了调度自动化的电源模块和电话交换机的电源模块。

2) 江西某110kV变电站在2004年的一次雷电活动中,综合自动化系统的电源模块被损坏。

3) 福建某35kV变电站在2005年5月的一次雷电活动中,雷电损坏了微机保护的电源模块,以及值班室的电视机和墙壁电源插座。

4) 1999年8月,云南一座变电站因遭受雷击,引起2台监控计算机的通信插件损坏,主板烧坏,影响了站内微机五防的运行,致使站内监控系统瘫痪。

5) 2003年,昆明市一座变电站因雷击原因,引起110kV母差保护插件损坏,母差保护设备被迫停运十多小时。

6) 2010年,吉安市某枢纽变电站因雷击原因引起光纤通信设备故障,直接影响OPEN3000系统的信号传输和公司办公系统的正常运行。

7) 韶关500kV曲江变电站的计算机综合自动化系统雷害事故频发。2005年5月12日和2006年9月9日分别发生了两起比较严重的雷电侵害事故,二次系统防雷改造后,2006年又发生了雷害事故,由于变电站附近落雷,在通信和控制线路上产生了很高的感应过电压,并沿着线路传递至接在低压电网上的通信系统,通信接口处的浪涌保护器动作,将雷电感应过电压泄放入专用等电位连接铜网。由于该变电站二次系统等电位连接的铜缆采用一点接地方式,约有200m铜缆在雷电过电压冲击下的等效电感上产生反击过电压,加上浪涌保护器的残压,对通信系统进行反击,损坏通信CAN网,造成了此次事故。

1.3 接地网安全性评价的意义

1.3.1 发电厂、变电站接地网评价存在的主要问题

接地网评价是接地网全生命周期管理的关键环节,对接地网评价正确与否,直接影响接地网全生命周期管理工作的成效,而接地网评价体系的科学性和评价标准的正确性则是接地网评价的基础。

由于接地技术发展水平造成对接地网认识的局限,接地网评价问题主要有:

(1) 评价方法和标准不科学。目前大型接地网评价工作的主要问题,集中在大多没有从接地网最根本的功能,即安全性能出发,过分重视接地阻抗一个指标,对地网电位升、网内电位差、接触电位差和跨步电位差等安全性指标重视不足,评价维度过少,接地网评价手段简单且不科学,达不到对其安全性进行正确评价的效果。

另一方面,缺乏评价标准或不合理,主要表现为:

1) 故障下地网电位升限值。从过电压耐受角度考核 10kV 避雷器,以二次系统耐受的网内电位差按 40% 占比反推地电位升极限值,偏于严格。GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》将地电位升从 2000V 放宽到 5000V 甚至更高,但没有给出明确的判据,缺乏操作性。

对于 10kV 及以下避雷器的反击耐受,目前国内外尚未系统地开展 10kV 及以下避雷器所能承受的最大地网反击过电压的研究。根据避雷器的工频耐受特性,简单地采用过电压分析方法处理,存在以下问题,首先,用入地短路电流的暂态最大值来校核避雷器的 1s 工频耐受电压,而短路电流暂态过程通常 0.2s 左右就结束,避雷器 1s 的工频耐压仍然采用暂态最大值来校验显然不科学;其次,接地故障通常远低于 1s 就切除,避雷器耐受时间仍取 1s 偏严格;最后,避雷器被地网电位升反击动作后,实际避雷器两端电压将急剧下降,因此传统分析方法考虑的工况过于严重,大大降低了地电位升的允许值,给接地网的设计和降阻增加了难度。按照避雷器吸收能量来校核其安全性无疑更为科学和合理。

金属外护套非双端接地的电力电缆的护层保护器(通常为 110kV 及以上电压等级)是对地网电位升反击耐受能力较弱的一次设备附件,其耐受问题并没有引起注意。

雷击冲击下的接地网电位分布特点与工频接地状态显著不同,所带来的安全问题构成了接地网评价的一个维度,这一问题尚未引起足够的重视,也缺乏相关研究。

2) 接地阻抗取值。通常以二次系统耐受为考核原则,偏严格,不科学。实际执行采取一刀切(0.5Ω),而对于具体的接地网,电位升限值才直接影响到接地阻抗的取值。

国外没有对接地阻抗作硬性的要求,GB/T 50065—2011 则规定了应低于 $2000V/I$ (I 为入地短路电流),在满足一定的条件时,地网电位升可以放宽到 5000V 甚至更高,由此核算接地阻抗并不合理:首先,5000V 是由极端保守的假设条件推算出的结果,实际由接地网网内电位差核算出来的地电位升限值则高得多;其次,仅从二次系统的耐受出发进行校核并不全面,实际上 10kV 及以下避雷器和电缆护层保护器的耐受往往较基于二次系统耐受的网内电位差限值推算得到的地网电位降低得多,应综合考虑核算结果来确定地网电位升限值,由此来确定接地阻抗的限值更为科学。

3) 网内电位差限值。相关标准和规程均按照二次设备工频一分钟耐受(不大于2000V)为考核原则,存在以下不合理性:首先,2000V的电位升产生的网内电位差较低,远低于二次电缆或元件的工频耐受电压水平(2000V,1min);其次,短路故障持续时间远远短于1min,二次电缆或元件绝缘耐受电压将远高于2000V。清华大学根据仿真研究,认为在极端的条件下最大网内电位差可占到地网电位升的40%,由此推出地网电位升可放宽到 $2000/40\%=5000\text{V}$,GB/T 50065—2011据此突破了地网电位升2000V的限值,放宽到5000V甚至更高,这是一个进步,但5000V的推荐值缺乏合理性,因为极端的假设情况实际上并不存在,应根据具体的接地网和站址土壤状况进行计算校核。总的说来,国内外关于二次系统能承受电位差限值的系统理论和试验研究工作不充分。

(2) 评价手段难以满足要求。

1) 测不准。如带地线进行接地阻抗测量;腐蚀状况诊断仍主要靠开挖取样,诊断标准不统一等。

2) 算不准,主要基于传统经验公式。如最大入地电流只能求取稳态值,没有反映最严苛情形;土壤结构的反演没有考虑分层复杂情形;没有科学模拟降阻措施;安全性指标或接地阻抗计算不正确等。

以上问题导致尚未建立科学的接地网评价方法,在接地网评价实践中造成混乱,各地开展接地网评价的技术水平参差不齐,评价结果难以切中要害,远远不能满足电网高速发展对接地技术的发展要求。

1.3.2 电力系统发展的形势对大型接地网评价技术的要求

接地网的作用主要体现在其安全性上。客观地说,由于接地网直接引起的电力系统事故较少,但我们往往忽略的“隐性”事故大量存在。由于接地网性能不良或特性参数不满足运行要求,或者腐蚀等因素引起接地网局部性能变坏,在接地短路故障或者遭受雷击(雷直击站内避雷针或近区雷击)时,可能导致接地网局部电位和电位差异常升高,给一、二次设备和人员带来潜在威胁,更重要的,将可能因接地网电位过高,反击或电缆外皮环流使得二次系统绝缘遭到破坏,或造成强烈的电磁骚扰,或二次系统正常工作条件遭破坏,严重者可能引起监测、控制或保护设备误动或拒动而“间接”导致事故扩大,事故状态下站内和站外人员安全风险等“隐性”事故则普遍存在,可能带来巨大的经济损失和社会影响。

随着我国电网高速发展,系统容量和短路电流水平持续升高;另外,电力技术发展日新月异,变电站自动化、数字化程度日益提高,带来了数字化电子设备和弱电子设备的普遍应用,数字化变电站将雨后春笋般涌现,大量应用的弱电子设备由于工作电压、绝缘水平和抗电磁骚扰能力普遍较低,接地工作条件非常严格,电磁兼容问题日益突出,二次系统和微电子设备的稳定运行对接地网安全性提出了越来越严格的要求;而与之不相适应的是,变电站和出线走廊的征地越来越困难,变电站的土壤条件愈发恶劣,在这个大背景下,二次设备和微电子设备对接地网电位升和接地网电位差等安全性指标的要求逐步提高,接地网状态满足电网、设备和人员安全性要求的难度越来越大。

接地网的隐蔽工程特征给其评价带来了一定的难度,部分地区的变电站不仅接地阻抗偏高,而且故障时流过接地网的短路电流偏大,均不利于有效地降低接地网电位升、跨步电位差和接触电位差水平,对接地网的安全性能是一个较大的考验,如何提高故障状态下设备和

人员的安全水平，是接地工作者需要解决的一个难题，基于接地网安全性的接地网评价技术和评价标准的建立，其现实意义和迫切性是不言而喻的。

1.4 接地网评价技术的发展

1.4.1 评价指标和手段

至今，国内外已就表征接地网特性的各个要素或指标的评价方法和标准进行研究，部分工作（如接触电位差、跨步电位差和电气完整性等）已较为成熟。

在数值仿真手段成熟之前，人们主要关注接地阻抗这个接地网的最基本参数，对于一些性状较为规则的接地网，接地阻抗可以通过解析求得，但仍不能解决复杂的多层不均匀土壤下接地阻抗的计算问题，通常基于经验公式和实测相结合的方法得到接地网的接地阻抗，给接地网的设计带来较大的盲目性。数值仿真手段和计算机技术的发展，使得复杂分层土壤模型和复杂接地网拓扑结构下的接地阻抗、短路电流分布特性、地网电位分布和地表电位分布等，均可以通过仿真计算得到，具备了分析接地网安全性指标的技术条件。相应地，国际上出现了成熟的商业化接地分析软件，典型如加拿大 SES 公司开发的国际上认可度很高的 CDEGS 接地软件，以及国内开发的 GASP2010 和 PSGA 专用接地分析软件等，在大型接地网设计和评价中具有无法替代的作用，然而接地软件在我国的应用水平参差不齐，高校偏重理论研究，电力系统单位的应用总体仍处于起步阶段。

1.4.2 入地故障短路电流的获取手段

入地短路电流水平直接影响到地网电位升这一安全性指标。实际入地电流通过地网散流入地，这部分电流不能直接测量得到，需通过测量总故障电流、地线分流和变压器中性点回流间接计算得到，获得站内故障电流的分布情况是获得入地电流的前提条件。

电力系统短路故障电流在初始阶段存在一段暂态过程，由于故障持续时间很短，暂态过程不能忽视，而短路电流的暂态峰值将产生最严重的地电位升、网内电位差、跨步电位差和接触电位差，因此短路电流暂态过程逐渐为人们所关注。基于大量理论和仿真分析，对于暂态短路故障电流中存在稳态交流分量和衰减的直流分量已是共识，且有试验佐证，同时短路初期的暂态过程振荡峰值比稳态峰值要高，且会持续一定的时间，也得到了广泛的认可。然而接地分析软件对故障电流分布的处理采用“场-路”结合的思想，以解决地线分流系数和接地网入地故障电流的计算问题。由于未考虑系统阻抗的影响，并且采用频域计算方法，只能计算稳态短路电流的分布，对于我们关注引起最严重地网安全问题的最大地网入地故障电流，仍无能为力。对于这个问题，工程上为严格起见，通常采用稳态电流乘以一定的系数（如 1.5 倍）来反映暂态电流最大值，具有较大的误差。国外对短路电流暂态过程的研究是在其稳态特性研究比较成熟之后才慢慢兴起的，国内相关的研究开展得晚一些，GB/T 50065—2011 添加了相应的内容。然而，对于系统参数变化时短路电流暂态特性的变化规律和影响因素的相关研究仍存在较大的空白，缺乏专门的理论仿真或试验研究作为依据。

对于发电厂、变电站内故障电流分布的获得方法，主要有：

(1) 建立短路电流的分流模型进行计算。对于同一个发电厂、变电站，其等效电路是通

用的,若给出总短路电流值和变压器中性点回流值,只需利用等效电路即可求得电流分布,免去了现场试验的麻烦。但存在以下缺点:各接地点并不在同一点接入地网,而是分布在地网各处,所以对于电流分布而言,接地网并不只是一个集中阻抗,该方法的模型等效存在误差;线路相线电流产生的磁场会在地线上产生感应电压,影响地线分流能力,将地线等效为一个集中分流阻抗的方法忽略了相线的影响,这些模型等效会引入不少误差,进而影响结果的精度。

(2) 现场人工短路试验。研究电流暂态特性和分布特性的另一手段是试验。在发电厂、变电站内产生短路接地故障,实测短路故障总电流、地线电流和变压器中性点电流,用短路故障电流减去变压器中性点电流和地线电流,得到入地电流。优点是全部数据均由现场实测得到,直接且真实,相对于使用等效模型计算的方法,在准确度上要略胜一筹。国内已进行过不少人工短路接地试验,但目的主要是考核一些电力设备或线路的可靠性、验证接地阻抗、跨步电位差和接触电位差等参数的计算或测量结果,针对短路电流暂态特性和分布特性,以及校验仿真模型和计算方法准确性的人工短路接地试验尚未开展。

针对以上情况,国内设计部门主要通过经验取值或简单的公式计算确定地线分流系数,据此确定入地电流水平,进而得到接地阻抗的设计值,往往造成接地阻抗的测量值与设计值有较大的出入。

1.4.3 接地故障下接地网电位升限值

故障状态下接地网电位升带来了设备的反击风险。发电厂、变电站的一次设备的工频绝缘水平普遍比较高,绝缘裕度较大,足以耐受接地故障时接地网电位升,为此,人们将注意力集中在对反击耐受能力较弱的10kV及以下避雷器和二次设备上。

对于10kV及以下电压等级避雷器,接地故障期间接地网电位升加在避雷器两端,避雷器承受电压为导线电压与地电位升之差。国内关于接地网的设计规范和标准,均要求保证发电厂、变电站内中压避雷器在接地网暂态电压的反击下不动作或不出现热崩溃。根据避雷器工频耐受时间特性,避雷器能够承受额定电压作用的时间大约为10s,而即便考虑最不利的情形,接地故障也会在1s以内切除,即加在避雷器两端的反击电位差不超过1s。

随着无间隙金属氧化物避雷器因其优越的保护性能正逐步取代普阀型避雷器,近年的标准也考虑了无间隙金属氧化物避雷器在接地网电位升条件下的耐受问题。水利行业标准SL 587—2012《水利水电工程接地设计规范》第4.1.3条要求,考虑地电位暂态电压的影响,当接地网电位升高时,3~10kV碳化硅避雷器间隙不应动作;暂态电压不应超过3~10kV金属氧化物1s内的工频耐受电压值,给出了接地网接地阻抗的允许值计算公式。然而,存在以下问题:①用入地短路电流的暂态最大值来校核避雷器的1s工频耐受电压,而入地短路电流暂态过程通常0.2s以后就结束,避雷器1s的工频耐压仍然采用暂态的最大值来校验显然是不科学的;②发电厂、变电站接地故障通常远低于1s就切除,避雷器耐受时间取1s则偏严格,考核避雷器所受的地电位升反击将比实际情况严重得多,大大降低了地电位升的允许值;③更重要的是,避雷器被接地网电位升反击动作后,作用在避雷器两端的电压将急剧下降,避雷器的负担大为减轻。针对上述问题,基于能量耐受的校核比基于过电压耐受的校核更为科学。

避雷器与一般设备绝缘的耐受行为不同,后者主要为电位差导致绝缘击穿,而避雷器则

是由于吸收的能量超过其散热能力，热平衡遭到破坏而发生热崩溃，GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》第4.3.2(3)条要求，应评估计入短路电流非周期分量的接地网电位升高条件下，发电厂、变电站内的6kV或10kV金属氧化物避雷器吸收能量的安全性。GB/T 50065—2011按照金属氧化物避雷器吸收能量来校核其安全性，无疑更为合理。

目前国内外尚缺乏对中压避雷器所能承受的最大接地网反击过电压的系统研究，通常都只是根据避雷器的工频耐受特性，简单地套用公式进行估算，忽略的因素过多，考虑的工况过于严重，而按照传统计算公式校验10kV避雷器能耐受的最大地电位升存在过于严格的问题，大大降低了地电位升的允许值，给接地网的设计带来了更大的难度。

1.4.4 接地故障下接地网网内电位差限值

影响发电厂、变电站二次设备或二次系统安全的最主要因素不是接地网电位升高多少，而是二次设备上是否出现高电位差，而二次设备绝缘层上在系统发生接地短路故障时所承受的电压主要由网内电位差决定。

对于二次系统的接地问题，首先必须认识下面4点：①大地上的所有点，即使在相当接近的距离，也不是等电位点；②接地网络的每个组成部分具有一定的阻抗或电阻；③电路元件只具有一定程度的暂态耐受能力，应确保环境干扰不超过单个电路元件的耐受极限；④由于局部暂态引起电位升达到较高值，电流流进连接的电缆电路，通过容性和感性耦合从受影响区域的接地电缆的屏蔽层耦合到信号线，这些电缆可能连接到暂态区域的外部，从而将高电位转移到所有与之相连的设备上。

由于故障状态下接地网电位升高具有“水涨船高”的效果，对二次设备绝缘耐受或二次系统运行影响主要体现在电缆或二次设备元件承受的电位差上，要求承受电位差不超过其短期耐受极限，而接地网的网内电位差在接地网电位升(GPR)中的占比相对较小，以往相关标准和规程均按照2000V的电位升来校核接地阻抗并不合理，原因是：①2000V的电位升产生的网内电位差较低，远低于二次电缆或元件的工频耐受电压水平；②短路故障持续时间很短，通常短于1s，更远低于1min，二次电缆或元件绝缘耐受电压将远高于2000V。

GB/T 50065—2011突破了接地网电位升2000V的限值，是一个进步，建议放宽到5000V甚至更高(需同时满足其他条件)，但只是给出指导性建议，而且5000V的推荐值是基于极端条件的土壤模型得出的，即5000V的地电位升在接地网的两个远端产生的网内电位差可以达到2000V，而这种极端情况实际上并不存在，应根据具体的接地网和土壤情况进行校核。

关于二次系统能承受电位差限值的系统试验研究工作报道甚少，基于二次设备和二次系统耐受的网内电位差限值要求在相关标准中均未提及，国内这方面的基础性试验工作仍做得不够充分，缺乏操作性。

1.4.5 接地网特性参数的评价

国外没有对接地阻抗作硬性的要求，GB/T 50065—2011则规定了应低于 $2000V/I$ (I 为入地短路电流)，在满足一定的条件时，地网电位升可以放宽到5000V甚至更高，由此核算接地阻抗并不合理，首先，如前所述，5000V是由极端的假设条件推出的结果，由实际

接地网网内电位差推算出来的地电位升限值则高得多；其次，仅从二次系统的耐受出发进行校核并不全面，实际上10kV及以下避雷器和电缆护层保护器的耐受往往较基于二次系统耐受的网内电位差限值推算得到的地网电位升限值低得多，应综合考虑核算结果来确定地网电位升限值，由此来确定接地阻抗的限值更为科学。

接触电位差和跨步电位差的安全限值，接地网电气完整性的判据，以及热稳定性校核等工作已较为成熟，并在GB/T 50065—2011和DL/T 475—2006《接地装置特性参数测量导则》等相关规程中体现。

接地网腐蚀状况诊断的手段主要仍为开挖取样，DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》推荐选点开挖存在盲目性和规范性等问题，且缺乏量化的判据，难以实现对全网导体腐蚀状况的准确诊断。近年来，重庆大学、清华大学和武汉大学等国内部分高校开展了基于电气和土壤理化特性的接地网导体腐蚀性诊断的研究，丰富了接地网导体腐蚀诊断手段。另一方面，接地网导体腐蚀状况的诊断标准和判据较多，尚未取得统一并在相关规程和标准中体现，执行起来缺乏规范性，影响了导体腐蚀状况的诊断效果。

1.4.6 接地网状态评估工作

在数值仿真手段成熟之前，接地网特性参数主要通过现场实测得到，由于接地网隐蔽性工程的特点，对整个接地网评价单纯采用现场测量的方法工作量太大，不可能将站内所有位置的参数都测出来，且现场实测准确性受到多方面因素的影响。基于电磁场原理的接地计算技术的发展为人们提供了崭新而更为准确的接地技术研究方法，以及接地网特性分析手段，使得接地网安全性状态评估成为近年来的热门课题。

接地网状态评估是通过对接地故障时接地网电位升、网内电位差、跨步电位差和接触电位差这4个安全性指标的评价来实现的，而我们所熟悉的接地网特性参数，包括反映接地网性能最基本的参数——接地阻抗，它们直接、间接或协同地影响着这4个安全性指标，因此通过接地阻抗、地线分流和入地故障电流、接地网电位升和电位差、跨步电位差和接触电位差、电气完整性、导体腐蚀状况和热稳定性等多个维度要素来评估接地网的现时状态，实现对接地网的安全性评估。

对于跨步电位差和接触电位差偏高的问题，通过接地网不等间距设计或局部加密等完善化设计就可迎刃而解。因此，接地网的安全性评价应着重考虑发生接地故障时对弱电设备的防护，严格控制接地系统的网内电位差，使系统发生接地短路故障时反击到弱电设备上的电压不超过其绝缘耐受强度。

接地网状态评估不仅是接地网运行维护关键问题的解决方案，同时也有力地指导接地网的设计和验收，为接地阻抗的科学选取和接地网的优化设计提供依据。

在评价手段方面，在完成接地网仿真计算模型工程校验和调整的基础上，主要借助数值仿真手段，准确给出在故障状态下，考虑架空避雷线和电缆外护套对故障电流的分流后，经接地网实际入地故障电流所引起电位分布，得到接地网电位升和网内电位差、地表电位和跨步电位差、接触电位差等反映接地网安全性指标的现时状态，加上接地网完整性、接地网和接地引下线导体腐蚀状况和热稳定校验结果，实现对接地网状态的多维度指标的全面评估，针对存在的安全隐患提出整改建议，并对整改措施进行仿真计算，指导大修技改设计，提高接地网的安全性。